干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析

郑　岚[1]，　张志斌[1]，　笪晓军[2]，　马亚兄[1]

（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州　730070；
2. 中国城市发展研究院西北研究所，甘肃 兰州　730000）

摘　要：土地生态安全评价对管控区域生态风险和保障生态安全具有重要意义。基于"数量安全-质量安全-结构安全-保障安全"模型构建指标评价体系，采用相对熵方法进行组合赋权，揭示嘉峪关市土地生态安全的动态变化过程，并运用因子分析法探讨其主要影响因素。结果表明：(1) 2000—2017年，嘉峪关市土地生态安全综合指数呈上升趋势，由2000年的0.415上升至2017年的0.644，安全等级由较不安全上升至临界安全，综合安全水平有所提升，但目前安全等级仍较低，土地生态安全风险仍然存在。(2) 各子系统中，数量安全指数波动变化不大，提升效果不明显；质量安全指数基本呈持续上升趋势，增长速度较快；结构安全指数2000—2009年增长较为明显，2009年后波动变化不大；保障安全指数呈明显的波动变化趋势，经历先增大再减小后波动增大过程，大致呈倾斜的"N"字型态势。(3) 土地生态安全变动的主要影响因素可整合为资源环境本底、产业结构演替、环境污染治理和生态建设成效4个方面。

关 键 词：土地生态安全；动态评价；影响因素；嘉峪关市
文章编号：

土地是人类生存和发展的基础，是人类繁衍生息和衣食住行必不可少的条件[1]。随着工业化和城市化进程的加快，人类对生态环境的影响不断加大，建设用地需求增加，耕地、林地被大量占用，水土流失加重，紧缺的土地资源和脆弱的生态环境严重制约了土地的可持续利用和经济社会的可持续发展，土地生态安全问题随之进入大众视野[2-4]。

土地生态安全是指在一定区域范围内，土地系统具有保持其结构与功能不受威胁或少受威胁，并为经济和社会的可持续发展提供服务的能力，从而维持复合生态系统的长期协调发展[5]。而土地生态安全评价则是揭示区域生态安全状况及变化态势的有效手段，对其生态状况起着监督和预警作用[6]。1976年，联合国粮食及农业组织（FAO）出版了《土地评价纲要》，首次针对特定土地利用方式对土地的适宜性进行了评价，并于1993年颁布了《可持续土地利用评价纲要》，确定了土地可持续利用的5项评价标准，很大程度上促进了土地生态安全评价的发展[7]。相关研究主要集中在土地的可持续性评价[8]、土地质量评价[9]、生态系统健康评价[10]和生态风险评价[11]等方面，研究尺度多为全球、国家和区域层面；国内的相关研究始于20世纪90年代，到2000年，国务院发布了《全国生态环境保护纲要》，开始从国家层面强调生态安全的必要性。2006年，国家《综合国土用途计划（2006—2020）》中明确提出了生态空间的管控要求，对土地生态安全评价产生了重要推动作用[12]。相关研究主要集中于土地生态安全评价[13]、土地适宜性评价[14]、土地敏感性评价[15]、土地承载力评价[16]、土地生态安全预警[17]等方面，研究尺度多为省域、市域和县域层面。

土地生态安全评价的关键环节是构建指标体系[18]，已有研究多为2种类型：一是采用"压力-状态-响应"（PSR）模型构建指标体系[19-20]，二是基于"自然-经济-社会"（NES）模型构建评价体系[21-22]。

收稿日期：2019-10-30；　**修订日期**：2020-06-03
基金项目：国家自然科学基金项目（41961029，41161028）
作者简介：郑岚（1995-），女，硕士研究生，主要研究方向为城市与区域规划. E-mail: zhenglan1970@163.com
通讯作者：张志斌（1965-），男，教授，博士生导师，主要研究方向为城市与区域规划. E-mail: zbzhang@nwnu.edu.cn

后续不少学者对模型的扩展基本都属于在两大模型内部的局部改进[23-24]。从两大模型指标体系的准则层来看,都不同程度地关注到了土地资源的数量安全、质量安全、结构安全、生态安全等方面,却忽略了土地系统自身因素和人为因素对土地生态安全的保障作用,包括直接保障和间接保障。因此,在借鉴已有成果的基础上,本文将保障安全纳入评价体系,采用"数量安全-质量安全-结构安全-保障安全"模型构建评价指标体系。同时,在确定指标权重时,运用相对熵方法计算组合权系数,以消除组合赋权法的不足,提高评价结果的准确性。

作为"一带一路"的重要节点城市和中国仅有的5个"直筒子市"①之一,嘉峪关市正处于快速城市化和向高度工业化迈进的重要时期,城市发展与扩张严重受制于脆弱的生态环境和紧缺的水土资源。文章以嘉峪关市为研究对象,并以西部大开发的开局之年(2000年)为时间起点,对2000—2017年嘉峪关市的土地生态安全进行动态评价,剖析其主要的影响因素,旨在为嘉峪关市土地的持续利用和国土空间规划的编制提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

嘉峪关市位于河西走廊中部、甘肃省的西北部,地理范围为39°37′58″~39°50′29″N,97°49′52″~98°31′24″E,南倚祁连山,北枕黑山,东临酒泉市肃州区,西连石油城玉门市,东北部与巴丹吉林沙漠接壤。全市面积为2935 km^2,东部为农业区,中部为城市建成区,西部多为戈壁,共辖峪泉、文殊、新城3镇。2017年总人口24.98×10^{4}人,城市人口达23.34×10^{4}人,城市化率高达93.45%,居甘肃省14个地市(州)首位。行政区域略呈平行四边形,东西较长,南北稍窄,地势西南高,东北低(图1)。气候为温带大陆性荒漠气候,日照长而强烈,降水少而蒸发强(年均降水量85.3 mm,蒸发量2149 mm),昼夜温差大且多大风天气;因地处戈壁腹地,干旱少雨,植被稀疏,生态脆弱。在土地利用方面也十分特殊[25]:一是属于典型的矿产资源型城市,工业用地面积大,仅酒泉钢铁集团就占了嘉峪关市建成区面积的1/3;二是为全国仅有的5个不设市辖区的地级市之一,农村人口少且多为两栖人口②,表现出"大城市、小农村"的特征,城镇化率高;三是未利用土地占比大,耕地只占市域面积的5.64%,土地污染及荒漠化十分突出,土地生态安全问题不容乐观。

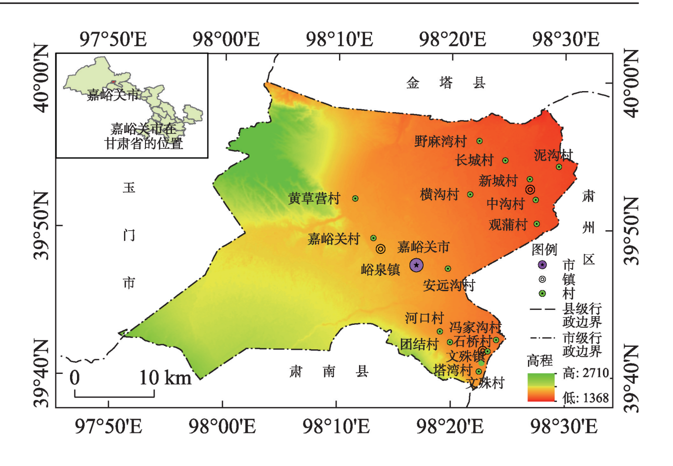


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

1.2 数据来源

研究涉及数据包括社会经济数据、环境数据、遥感影像数据等。其中,社会经济数据来源于《嘉峪关市统计年鉴》、《嘉峪关市国民经济和社会发展统计公报》和《嘉峪关市人口普查主要数据公报》等;环境方面数据来自于《嘉峪关市环境状况公报》等;遥感影像数据主要是DEM数据和NDVI数据,来源于地理数据空间云(http://www.gscloud.cn/),运用ArcGIS 10.2和ENVI 5.2进行运算、裁剪和提取得到。

2 研究方法

2.1 土地生态安全评价体系构建

2.1.1 指标选取 遵循科学性、代表性、合理性原则,结合嘉峪关市的城市特点,从数量安全-质量安全-结构安全-保障安全4个方面,选取了35项指标构建土地生态安全评价指标体系。其中,数量安全指标主要反映土地资源人均利用情况及社会经济现状,质量安全指标表征土地的生产能力、供给水平及存在的潜在风险,结构安全指标主要衡量土地利用结构和社会经济结构的合理性,保障安全指标主要反映政府、企业和社会对土地生态安全的保障力度。由此构成4个准则、8个要素和35项指标的评

① "直筒子市"即不设市辖区、不管辖区县、自治县、自治旗,也不代管县级市的地级市。全国共有中山、东莞、儋州、三沙和嘉峪关5座城市。

② 两栖人口指不变更户籍,暂时离开原住所,以劳务输出为目的的农村劳动者,如生根在农村、生活在城市的农民工群体。

价体系(表1),既涵盖了土地的生产、生活和生态功能,也兼顾了嘉峪关"戈壁钢城"的土地利用特点。

2.1.2　指标标准化　为使指标间具有可比性,通过极差归一化对正向和负向指标进行无量纲处理[26],公式如下:

$$正向指标:S_{ij}=(1-x)+x\frac{T_{ij}-T_{\min j}}{\left|T_{\max j}-T_{\min j}\right|} \quad (1)$$

$$负向指标:S_{ij}=(1-x)+x\frac{T_{\max j}-T_{ij}}{\left|T_{\max j}-T_{\min j}\right|} \quad (2)$$

表1　嘉峪关市土地生态安全评价指标体系及权重

Tab. 1　Index system and weight of land ecological security evaluation in Jiayuguan City

准则层	要素层	指标层	单位	权重/%	属性
数量安全(A_1)	资源禀赋条件(B_1)	T_1人均耕地面积	$hm^2·人^{-1}$	2.91	正
		T_2人均建设用地面积	$hm^2·人^{-1}$	2.58	负
		T_3人均林草地面积	$hm^2·人^{-1}$	3.30	正
		T_4人均未利用地面积	$hm^2·人^{-1}$	3.03	正
		T_5人均水资源量	$m^3·人^{-1}$	3.07	正
	社会经济条件(B_2)	T_6人均GDP	$元·人^{-1}$	2.59	正
		T_7地均GDP	$10^4元·hm^{-2}$	2.68	正
		T_8城镇居民可支配收入	元	3.02	正
		T_9地方财政收入	10^8元	3.17	正
质量安全(A_2)	土地退化(B_3)	T_{10}土地荒漠化率	%	2.07	负
		T_{11}植被覆盖度	%	2.50	正
		T_{12}单位面积农业污染负荷指数		2.69	负
		T_{13}单位面积工业污染负荷指数		2.60	负
	产出能力(B_4)	T_{14}复种指数		2.22	正
		T_{15}单位耕地农业机械动力	$kW·hm^{-2}$	4.01	正
		T_{16}单位面积粮食产量	$kg·hm^{-2}$	2.63	正
		T_{17}农林牧渔增加值	10^4元	3.10	正
		T_{18}工业增加值	10^4元	2.70	正
结构安全(A_3)	土地利用结构(B_5)	T_{19}耕地占农用地比例	%	2.56	正
		T_{20}耕地面积比重	%	3.20	正
		T_{21}建设用地指数	%	2.63	负
		T_{22}森林覆盖率	%	2.90	正
		T_{23}未利用土地面积比重	%	2.77	正
	社会经济结构(B_6)	T_{24}人口密度	$人·km^{-2}$	2.87	负
		T_{25}经济密度	$10^4元·km^{-2}$	2.68	正
		T_{26}第三产业比重	%	3.65	正
		T_{27}城镇化率	%	2.22	正
保障安全(A_4)	直接保障(B_7)	T_{28}人均公共绿地面积	$m^2·人^{-1}$	2.69	正
		T_{29}人工造林面积	hm^2	3.39	正
		T_{30}灌溉指数	%	3.40	正
		T_{31}水土协调度		2.85	正
	间接保障(B_8)	T_{32}工业固废综合利用率	%	2.45	正
		T_{33}工业废水达标排放率	%	1.71	正
		T_{34}旅游及相关产业收入	10^8元	3.67	正
		T_{35}污染治理投资占GDP比重	%	3.47	正

注:由于嘉峪关农药统计量未公布,仅采用化肥和地膜来计算负荷指数,单位面积农业污染负荷指数=单位面积化肥负荷指数×0.7+单位面积地膜负荷指数×0.3;单位面积工业污染负荷指数=单位面积废水负荷指数×0.6+单位面积废气负荷指数×0.3+单位面积固体废弃物负荷指数×0.1[18];复种指数=农作物的播种面积/区域耕地面积比重,反映耕地利用程度;水土协调度=(区域水资源量/全国水资源量)/(区域耕地规模/全国耕地规模),指相对于全国而言,单位耕地面积上水资源量的裕乏程度。

式中：S_{ij}为标准化后的值；T_{ij}为第i年第j指标的原始值；$T_{\max j}$和$T_{\min j}$分别为相应指标的最大值和最小值；x取0.9[27]。

2.1.3 指标权重确定 权重指的是某一指标在整个指标体系中的相对重要程度。计算权重有多种方法，其中熵权法和变异系数法各有利弊，因此先分别计算出2种赋权法下的指标权重，再运用相对熵方法计算组合权系数，最后采用组合赋权法计算组合权重[28]。

首先构建优化模型：

$$\begin{cases} \min: \sum_{i=1}^{Q}\sum_{j=1}^{P} d_j \log\frac{d_j}{u_{ij}} \\ \text{s.t:} \sum_{j=1}^{P} d_j = 1,\ d_j > 0,\ (j\in P) \end{cases} \tag{3}$$

其次，计算出与各单一赋权法所得权重最接近的指标权重，即集结权重$d=(d_1, d_2, \cdots, d_p)$，解得最优解：

$$d_j = \frac{\prod_{i=1}^{Q}(u_{ij})^{\frac{1}{Q}}}{\sum_{j=1}^{P}\prod_{i=1}^{Q}(u_{ij})^{\frac{1}{Q}}} \tag{4}$$

其中，u_{ij}为第i种单一赋权法第j个指标的权重(i=1, 2,⋯, Q; j=1, 2,⋯, P)，再计算每一赋权结果与集结权重的贴近度$h[u_i, d]$和可信度θ_k：

$$\theta_k = \frac{h[u_i, d]}{\sum_{i=1}^{Q} h[u_i, d]} \quad (k=1, 2, \cdots, Q) \tag{5}$$

通过计算得到熵权法和变异系数法的组合权系数θ_1和θ_2分别为0.5135，0.4865，故组合权重公式如下：

$$\omega_j = \theta_1 u_{1j} + \theta_2 u_{2j} \tag{6}$$

式中：ω_j为组合权重；u_{1j}和u_{2j}分别为熵权法和变异系数法所求第j个指标的权重。指标体系及权重结果见表1。

2.1.4 综合指数计算 采用加权求和法[29]，计算土地生态安全指数，公式如下：

$$\text{LESI}_j = \sum_{j=1}^{m} T_j \times \omega_j \tag{7}$$

式中：LESI_j为j个指标的土地生态安全指数，取值范围为[0, 1]；T_j为第j个指标的标准化值；ω_j为第j指标的权重。

2.2 土地生态安全分级

在充分考虑嘉峪关市土地利用现状和土地生态安全稳定性基础上，以非等间距方式[30]将土地生态安全等级划分为不安全、较不安全、临界安全、较安全和安全5个标准(表2)，依据综合指数所处安全等级判断其土地生态安全状况。

2.3 因子分析法

因子分析法是从研究变量内部相关的依赖关系出发，把一些具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合因子的一种多变量统计分析方法[31]。通过因子分析，将原变量中的信息进行转化，使得分析更简单、直观。计算步骤如下：(1) 计算相关系数矩阵，一般要求大部分相关系数≥0.3；(2) 因子提取：根据样本数据，通过主成分分析法求解因子载荷矩阵，将原有变量综合成少数几个因子；(3) 因子命名解释：观察因子载荷矩阵，因子载荷的绝对值在某行都有较大取值时，实际含义模糊不清，通过因子旋转(正交旋转和斜交旋转)使得尽可能少的因子有较高载荷，因子的实际含义更清楚；(4) 计算因子得分。

3 嘉峪关市土地生态安全评价

3.1 土地生态安全总体评价

整体来看，土地生态安全综合指数(图2)呈上升趋势，由2000年的0.415上升至2017年的0.644，安全等级由较不安全(Ⅱ)上升至临界安全(Ⅲ)，这是西部大开发战略实施以来，嘉峪关市产业结构转型升级、退耕还林和环境综合治理取得的成效。2017年城镇化率达到93.45%，远高于甘肃省和全国平均水平，为经济发展和土地集约利用提供了坚固的基础。人均GDP由2000年的11227.30元·人$^{-1}$增加到2017年的84463.57元·人$^{-1}$，居民人均可支配的收入由2000年的6750元提高到36491元，均居全省

表2 嘉峪关市土地生态安全评价等级标准

Tab. 2 Level standard for evaluation of land ecological security in Jiayuguan City

安全等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
安全值	[0,0.3)	[0.3,0.5)	[0.5,0.7)	[0.7,0.9)	[0.9,1]
土地生态系统状况	不安全	较不安全	临界安全	较安全	安全

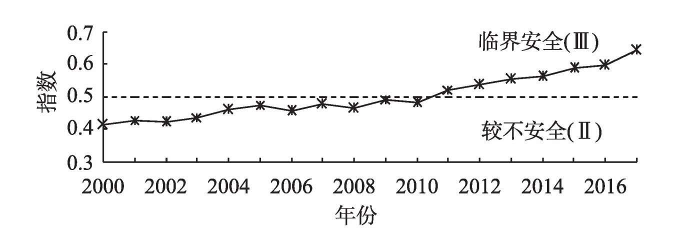


图2　嘉峪关市土地生态安全综合指数

Fig. 2　Comprehensive index of land ecological security in Jiayuguan City

14个地市首位。其中，2000—2010年，综合指数由0.415增长至0.483，年均增长率为1.526%，虽在2005—2010年有所波动，但仍处于较不安全状态；2011—2017年，综合指数由0.524上升至0.644，年均增长率为3.502%，达到了临界安全等级，并逐渐接近临界安全等级上限，说明嘉峪关市的土地生态安全得到较为明显的改善。其中2005—2010年改善程度较为缓慢，主要是因为工业园和嘉东新区建设，使得人均建设用地和工业"三废"排放量增加，加之水土协调度和灌溉指数下降，一定程度上减缓了土地生态安全的增长速度；2011年以来，随着"十二五"规划的实施，嘉峪关市积极转变经济发展方式，不再单纯追求GDP的增长速度，更加注重经济质量的提升，产业结构也相应得到合理调整，第三产业比重波动快速提升。同时，政府加大环境保护力度，大力推进生态文明建设，实施了讨赖河生态治理、"两湖一河"园林景观、南湖文化生态园等项目建设，使得嘉峪关市的土地生态安全在2011—2017年改善较为明显，并有向更高等级发展的趋势。

3.2　各子系统土地生态安全分析

3.2.1　*数量安全评价*　如图3所示，数量安全分值在0.11~0.14之间波动变化，提升不明显。从耕地面积来看，随着城市人口的不断增加，土地资源的需求量逐年加大，嘉峪关市的耕地面积由2000年的

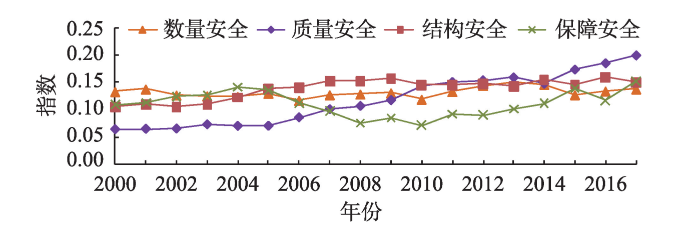


图3　嘉峪关市土地生态安全各准则层分值

Fig. 3　Each criterion level of land ecological security in Jiayuguan City

3037 hm^2扩展到6907 hm^2，人均耕地面积由0.019 $hm^2 \cdot 人^{-1}$增加到0.027 $hm^2 \cdot 人^{-1}$，尽管增速很快，但仍然是全省人均耕地占有量最少的地市（不足0.03 hm^2），耕地资源的保护任重道远；从建设用地来看，工业化进程的加快，不可避免地带来建设用地的迅速增加，人均建设用地面积由2000年的206.20 $m^2 \cdot 人^{-1}$增加到2017年的289.39 $m^2 \cdot 人^{-1}$（远大于国家150 $m^2 \cdot 人^{-1}$的标准），土地利用效率和开发强度相对较低，乱建、乱占、圈地以及"批而未建"的现象存在使得大量土地资源流失和闲置，土地资源浪费较为严重；土地扩张主要是通过开发未利用土地实现的，人均面积由0.70 $hm^2 \cdot 人^{-1}$降至0.35 $hm^2 \cdot 人^{-1}$，其中多为荒漠、戈壁，可利用的土地面积较少，后备土地资源严重不足；地表河流仅有讨赖河，受分水制度限制，可利用水资源量小于入境水资源量，同时受气候条件影响，蒸发量远远大于降水量，2017年人均水资源量降至1329 m^3，而工业用水和生态绿化用水量大、节水农业体量小、中水回收利用率较低等使得用水量逐渐增加，水资源短缺严重制约着嘉峪关市的发展。

3.2.2　*质量安全评价*　质量安全分值除2015年有所回落外，基本呈持续上升趋势，年增长率为6.89%。期间农林牧渔增加值、工业增加值分别年均增长11.23%和13.10%，单位面积粮食产量由2000年的8359 $kg \cdot hm^{-2}$增加到2017年的11382 $kg \cdot hm^{-2}$，土地产出能力不断增强，对土地生态安全有着积极的推动作用；同时，受西北地区由暖干向暖湿气候转变的大环境影响，嘉峪关市年降雨量逐渐增加，大风、沙尘暴等天气次数下降，一定程度上减轻了土地沙漠化等灾害的影响；城市绿化工作取得了显著成绩，城市绿化水平有了较大提高，植被覆盖指数达到19.88，土地的荒漠化面积降低，促进了土地生态安全指数的提升。但随着耕地和建设用地面积的增加，农用化肥和地膜使用量上升，工业中废水、废气和固废的排放量呈上升趋势，尤其是大量尾矿露天存放，这些固体堆积物不仅占用面积较大，而且一定程度上加重了土地污染负荷程度，对环境和人体的危害较大，因此土地退化风险对土地生态安全仍存在较强约束作用。

3.2.3　*结构安全评价*　结构安全分值在2000—2009年上升明显，由0.106上升至0.158，年增速为4.49%，2009年后基本在0.14~0.15之间波动变化。耕地面积比重由2.25%增加到5.64%，为提高粮食产

量、满足人们的基本需求提供了保障,其中耕地占农业用地面积比重呈现先增大后减小的趋势,2009年达到最高值(23.67%),说明生态退耕政策对嘉峪关市土地利用特别是农用地内部结构产生了较大影响;建设用地面积比重由4.35%增加至12.34%,主要通过开发未利用土地而非占用耕地,土地利用结构相对稳定,但也由于嘉峪关未利用土地面积较大,开发时一定程度上忽视了对已利用土地的整治改造,存在使用效率和集约经营程度较低的问题,使得未利用土地面积比重由81.8%降至71.2%,尤其是2009年后未利用土地开发力度加大,使得结构安全提升不明显;随着绿化建设和植树造林活动的持续开展,城市绿化覆盖率逐渐增加,森林覆盖率也日益增长,由1.7%增长至12.14%,对净化空气、调节气候、保持水土具有重要作用,逐渐提升了嘉峪关市的宜居性。

3.2.4 保障安全评价 保障安全分值经历了先增大后减小再波动增大的过程(大致呈倾斜的"N"字型态势),2000—2004年和2011—2017年呈上升趋势,2005—2010年呈下降趋势,其中2010年为最小值(0.072),2017年为最大值(0.154)。在"开发中保护、在保护中开发"的方针指导下,嘉峪关市相继出台了一系列生态环境保护方面的政策和措施,人均公共绿地面积由2000年的6.24 $m^2\cdot$人$^{-1}$增加至2017年的35.61 $m^2\cdot$人$^{-1}$,人工造林面积由93 $hm^2\cdot a^{-1}$波动增长至2109 $hm^2\cdot a^{-1}$;随着产业的转型升级,第三产业发展迅速,其中旅游及相关产业收入由0.9×10^8元增加至57.21×10^8元,实现了旅游资源优势向经济优势的转化,产业结构趋于合理;同时,不断调整土地利用结构,加大环境污染治理投资,严格控制污染排放,各大产业园区遵循循环经济建设理念,提高企业准入门槛,积极推动生态化改造,环境保护意识不断增强。

4 主要影响因素分析

运用SPSS 20.0对所选指标进行因子分析,根据原有变量相关系数矩阵,采用主成分分析法提取特征值>1的因子(表3),通过最大方差法进行正交变换,得到旋转成分载荷表(表4),提取了4个公因子,方差贡献率分别为56.473%,21.199%,8.767%,4.185%,累计贡献率达90.625%,描述了原有变量的大部分信息。第1公共因子与大多数指标存在较高的相关性,包括T_1、T_3~T_4、T_6~T_7、T_{11}、T_{18}、T_{20}、T_{25}和T_{31},表明资源环境本底对土地生态安全的影响;第2公共因子在T_{15}~T_{16}、T_{26}、T_{34}处载荷较大,表明产业结构演替对土地生态安全的影响;第3公共因子在T_{19}、T_{33}、T_{35}处载荷较大,表明环境污染治理对土地生态安全的影响;第4公共因子在T_{29}处载荷较大,表明生态建设成效对土地生态安全的影响。

4.1 资源环境本底

资源环境本底的特征值为19.766,贡献率高达56.473%,是影响土地生态安全最重要因素。嘉峪

表3 特征值及累计贡献率

Tab. 3 Eigenvalues and cumulative contribution rates

成分	初始特征值			旋转平方和		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	23.402	66.862	66.862	19.766	56.473	56.473
2	5.270	15.056	81.919	7.420	21.199	77.672
3	1.750	5.001	86.919	3.068	8.767	86.439
4	1.297	3.705	90.625	1.465	4.185	90.625

表4 旋转成分载荷表

Tab. 4 Rotating component load table

成分	指标(载荷)	因子命名
1	T_1 (0.921), T_3 (−0.924), T_4 (−0.909), T_6 (0.936), T_7 (0.941), T_{11} (0.977), T_{18} (0.928), T_{20} (0.930), T_{25} (0.941), T_{31} (−0.929)	资源环境本底
2	T_{15} (0.876), T_{16} (0.852), T_{26} (0.932), T_{34} (0.814)	产业结构演替
3	T_{19} (0.827), T_{33} (0.658), T_{35} (−0.587)	环境污染治理
4	T_{29} (0.885)	生态建设成效

关市地处干旱区，属于温带大陆性荒漠气候，全年大风沙尘天气较多，降水偏少（年均降水量85.3 mm，远低于全国平均降水总量），春季干旱严重，盛夏易出现伏旱天气，人均水资源量仅为全国人均水平的一半，脆弱的环境本底加大了土地生态安全的压力。近20 a来，嘉峪关市人口规模、经济规模、城乡居民的生活水平等均有了显著提高，使得耕地、林地和建设用地面积不断增加，而草地和未利用地面积逐年减少。与其他城市不同的是，嘉峪关市主要通过占用未利用地来扩大建设用地面积，土地开发利用的压力相对较小，与其特有的资源环境本底密不可分。不过，目前建设用地标准明显高于国家规定，土地集约程度相对较低，宜农、宜林、宜牧土地后备资源不足，加之地处大漠戈壁，水资源严重缺乏，生态服务系统的自我调节功能较弱，加之“西气东输”、“西油东输”等建设工程穿越了水源地，潜在的安全隐患使得土地生态安全压力仍不容轻视。

4.2　产业结构演替

产业结构演替的特征值为7.420，贡献率为21.199%。长期以来，嘉峪关作为省内乃至国内著名的矿产资源型城市，过度依赖大型央企酒泉钢铁集团，产业结构呈“二三一”格局，工业“一家独大”的特征十分突出，且短期内难以改变，一定程度上加剧了生态环境的脆弱性，社会经济发展消耗的环境成本高，时刻影响着城市的土地生态安全。不过，2000年以来政府大力倡导“转方式、调结构、促效益”，不断引进先进技术发展循环经济，积极扶持高新技术产业，使得第二产业比重波动下降。同时，充分挖掘当地丰富的旅游资源，加快第三产业发展，三大产业比例已由2000年的3.39:70.76:25.85演变为2017年的2.2:51.8:46，产业结构逐步趋于合理。可以说，调整产业结构，以产促城、以城兴产、产城融合，是推动区域发展的必由之路。

4.3　环境污染治理

环境污染治理的特征值为3.068，贡献率为8.767%，也是影响土地生态安全的重要因素之一。嘉峪关市政府始终坚持以可持续发展战略为指导，紧紧抓住“一控双达标”和“加大环境执法监督和污染源治理”等重点工作，不断加大环境污染治理投资力度，加快环境科技创新，加强污染专项整治，强化污染物排放总量控制，使得固废综合利用率由2000年的12.11%上升至2017年的62.90%、工业废水的达标排放率现已达100%。坚持“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念，紧抓国家实施西部大开发和大力发展新能源产业的重大机遇，严格执行国务院出台的大气污染防治“十条措施”，逐步淘汰排污严重、产能低下、工艺落后的污染企业，对土地生态安全起到重要的保障作用。

4.4　生态建设成效

生态建设成效的特征值为1.465，贡献率为4.185%。至2017年，嘉峪关市已连续开展了22个绿化年活动，通过大力开展植树造林活动，建成区植被覆盖率由17.20%提高至39.41%，全市95%以上道路达到了绿色通道标准。同时，通过扩建水库（大草滩水库）、兴建人工湖泊（东湖生态旅游景区）和增加城区园林绿地等工程，使得水体和绿地面积显著扩大，大大改善了城市生态环境。充分利用良好的光照资源、雄厚的工业基础和较强的产业配套能力等优势，大力开发利用新能源和可再生能源，着力发展光伏发电产业，已初步形成了全省重要的新能源基地，一定程度上减少了对化石燃料的依赖，对减缓气候变暖起着积极作用。境内年平均降水量有所增加，干热风、大风、浮尘、沙尘暴、寒潮、高温、强降温等天气次数显著减少，持续的生态建设提升了土地的生态安全指数。

5　结 论

（1）土地生态安全呈上升趋势，经历了“较不安全–临界安全”2个阶段，2000—2010年处于较不安全状态，2011—2017年达到临界安全级别，并有向更高等级发展的趋势，说明西部大开发战略实施以来，嘉峪关市产业结构转型升级、退耕还林和环境综合治理取得了较好成效。

（2）从子系统变化趋势看，数量安全指数波动变化不大，提升效果不明显；质量安全基本呈持续上升趋势，增长率相对较高；结构安全前期增长明显，2009年后基本在0.14~0.15之间波动变化；保障安全指数呈明显的波动变化趋势，经历先增大再减小后波动增大过程，大致呈倾斜的“N”字型。

（3）通过因子分析，将影响土地生态安全的主要因素整合为资源环境本底、产业结构演替、环境污染治理和生态建设成效等4个方面，是保障嘉峪关市未来土地可持续利用和实现生态文明战略的重中之重。

6 讨 论

土地是一切经济与社会活动的载体，城市建设、经济发展、人居环境的改善等，都离不开资源环境本底。被誉为“戈壁钢城”的嘉峪关市，按照“一特二提三转”的原则，在确保农业稳定发展的基础上，大力发展低碳经济和循环经济，不断壮大清洁能源产业，打造区域品牌，延伸产业链条，加快产业升级，引导第三产业转型发展，积极构建现代服务业体系，实现产业结构不断优化。同时，大力开展退耕还林、植树种草、引水成湖等一系列生态工程，不断扩大城区绿化面积和水域面积，使原本的戈壁荒滩发展成为“不是江南胜似江南”的现代化城市，尽管其土地生态安全等级还不高，安全风险依然存在，但已经走出了一条具有自身特色的城市化发展道路，为矿产资源型城市的可持续发展提供了宝贵的经验和借鉴。

此外，本文也存在一些不足：受数据获取方面的限制，未将土壤质量、立地条件等指标考虑在内，土地生态安全评价的指标体系有待进一步完善；仅从时间维度展开分析评价，未从空间维度对城市内部各个街道（乡镇）以及各种用地类型的差异化进行刻画，将是后续研究中需要进一步努力的方向。

参考文献（References）

[1] Scholz M, Hedmark A, Hartley W. Recent advances in sustainable multifunctional land and urban management in Europe: A review[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2012, 55(7): 833-854.

[2] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils[J]. Nature, 1996, 380(6573): 419-422.

[3] Sterr T. Interactions between water-land resources and oasis urban development at the northern slopes of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(2): 221-229.

[4] 赵领娣, 李莎莎, 赵志博, 等. 干旱半干旱区城市生态效率时空演变及区域差异分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 449-457. [Zhao Lingdi, Li Shasha, Zhao Zhibo, et al. Temporal and spatial evolution and regional difference analysis of urban ecological efficiency in arid and semiarid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 449-457.]

[5] 张小虎, 雷国平, 袁磊, 等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(1): 88-93. [Zhang Xiaohu, Lei Guoping, Yuan Lei, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: A case study of Heilongjiang Province[J]. China Population Resources and Environment, 2009, 19(1): 88-93.]

[6] 熊建华. 土地生态安全评价研究回顾、难点与思考[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 71-76. [Xiong Jianhua. Review, difficulties and thinking of land ecological security evaluation[J]. Geography and Geo-information Science, 2018, 34(6): 71-76.]

[7] 郭旭东, 谢俊奇, 李双成, 等. 土地生态学发展历程及中国土地生态学发展建议[J]. 中国土地科学, 2015, 29(9): 4-10. [Guo Xudong, Xie Junqi, Li Shuangcheng, et al. Development experience of land ecology and suggestions for improvement of China's land ecology[J]. China Land Science, 2015, 29(9): 4-10.]

[8] Laurentiis V D, Secchi M, Bos U, et al. Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 215: 63-74.

[9] Maria F D, Sisani F. A sustainability assessment for use on land or wastewater treatment of the digestate from bio-waste[J]. Waste Management, 2019, 87: 741-750.

[10] Herrick J E, Shaver P, Pyke D A, et al. A strategy for defining the reference for land health and degradation assessments[J]. Ecological Indicators, 2019, 97: 225-230.

[11] Gworek B, Helena A B, Kalinowski R, et al. Ecological risk assessment for land contaminated by petrochemical industry[J]. PLoS ONE, 2018, 13(10): 1-15.

[12] 李昊, 李世平, 银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 50-56. [Li Hao, Li Shiping, Yin Minhua. Research progress and prospect of land ecological security in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 50-56.]

[13] 王鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 168-172. [Wang Peng, Kuang Fumin, Deng Yuwu, et al. Assesment of land eco-security of the Hengyang City on the principal component[J]. Economic Geography, 2015, 35(1): 168-172.]

[14] 谭少军, 邵景安. 基于生态适宜性评价的西南丘陵区土地整治工程布局研究[J]. 地理研究, 2018, 37(4): 659-677. [Tan Shaojun, Shao Jing'an. Land consolidation project layout based on ecological suitability evaluation in hilly areas of southwest China[J]. Geographical Research, 2018, 37(4): 659-677.]

[15] 韩鹏冉, 严成, 孙永秀, 等. 克拉玛依市中部城区外围生态敏感性评价[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1217-1222. [Han Pengran, Yan Cheng, Sui Yongxiu, et al. GIS-based assessment of eco-environmental sensitivity in peripheral regions of Karamay central urban area[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1217-1222.]

[16] 黄宇驰, 苏敬华, 吕峰. 基于SEP模型的土地资源承载力评价方法研究——以上海市闵行区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 124-127. [Huang Yuchi, Su Jinghua, Lü Feng. Evaluation method of land resources carrying capacity based on SEP model: A case of Minhang District in Shanghai[J]. China Popula-

tion Resources and Environment, 2017, 27(S1): 124-127.]

[17] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于RBF的湖南省土地生态安全动态预警[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422. [Xu Mei, Zhu Xiang, Liu Chunla. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1411-1422.]

[18] 李春燕, 南灵. 陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 中国土地科学, 2015, 29(4): 72-81. [Li Chunyan, Nan Ling. Dynamic evaluation and diagnosis of obstacle factors on land eco-security in Shaanxi Province[J]. China Land Science, 2015, 29(4): 72-81.]

[19] 曾翠萍, 邱慧珍, 张文明, 等. 基于PSR模型的庆阳市生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 67-72. [Zeng Cuiping, Qiu Huizhen, Zhang Wenming, et al. Assessment on ecological security of Qingyang based on PSR model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(12): 67-72.]

[20] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 295-304. [Tian Fengshou, Liu Xinping, Yuan Weipeng. Ecological risk assessment of farmland non-point source pollution in Hotan Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 295-304.]

[21] 刘艳, 桂智凡. 基于"自然-经济-社会"模型的土地生态安全评价研究——以黄石市为例[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(28): 11536-11539. [Liu Yan, Gui Zhifan. The land ecological safety evaluation of Huangshi City based on "Natural-Economic-Social" Model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(28): 11536-11539.]

[22] 孙丕苓, 杨海娟, 刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究——以陕西省商洛市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1520-1530. [Sui Piling, Yang Haijuan, Liu Qingguo. Study on dynamic security of land ecology in water source area of South to North Water Diversion Project: A case study of Shangluo City, Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(9): 1520-1530.]

[23] 王晶, 原伟鹏, 刘新平. 哈尔滨城市土地生态安全时序评价及预测分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 885-892. [Wang Jing, Yuan Weipeng, Liu Xinping. Time series evaluation and prediction analysis of urban land ecological security in Harbin City[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 885-892.]

[24] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 基于GIS和组合赋权法的石羊河流域生态环境质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 175-180. [Wei Wei, Shi Peiji, Zhou Junju, et al. Comprehensive assessment of eco-environmental quality based on GIS and combination weighting method in Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 175-180.]

[25] 尤凤. 嘉峪关市土地集约利用潜力研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [You Feng. The research on intensive land use and potential in Jiayuguan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]

[26] 李伟伟, 易平涛, 李玲玉. 综合评价中异常值的识别及无量纲化处理方法[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4): 173-178. [Li Weiwei, Yi Pingtao, Li Lingyu. Outliers recognition and the dimensionless method in comprehensive evaluation[J]. Operation Research and Management Science, 2018, 27(4): 173-178.]

[27] 于海洋, 张飞, 曹雷, 等. 基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究——以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6355-6369. [Yu Haiyang, Zhang Fei, Cao Lei, et al. Spatial-temporal pattern of land ecological security at a township scale in the Bortala Mongolian Autonomous Prefecture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6355-6369.]

[28] 崔明哲, 杨凤海, 李佳. 基于组合赋权法的哈尔滨市耕地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 184-187, 192. [Cui Mingzhe, Yang Fenghai, Li Jia. Analysis of cultivated land ecological security assessment of Harbin City based on combination weighting method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 184-187, 192.]

[29] 杨发鹏, 张雪唱, 李宗阳. 城市旅游"三生"竞争力空间分异——以西北五省为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 664-672. [Yang Fapeng, Zhang Xuechang, Li Zongyang. Spatial differentiation of the "production-life-ecology" competitiveness in urban tourism: A case study of five provinces in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 664-672.

[30] 朱晓华, 宋冬梅, 色布力马. 甘肃民勤绿洲土地空间结构动态变化及其灰色预测[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 686-691. [Zhu Xiaohua, Song Dongmei, Sebulima. Dynamic change and grey prediction of land spatial structure in the Mingin, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 686-691.]

[31] 孙余. 基于因子分析法的高职学生成绩评价[J]. 物联网技术, 2013, 3(3): 81-83. [Sui Yu. The vocational student achievement evaluation based on factor analysis[J]. Internet of Things Technologies, 2013, 3(3): 81-83.]

Dynamic evaluation and influencing factors of land ecological security in Jiayuguan City

ZHENG Lan[1], ZHANG Zhibin[1], DA Xiaojun[2], MA Yaxiong[1]

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Northwest Institute of China City Development Academy, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Land is the basis of human existence and development. In recent years, the development of industrialization and urbanization has been accelerating, impact of human beings on the ecological environment has been increasing, and land ecological security issues such as structural contradictions in land use and land degradation have been gaining attention. These changes seriously restrict the sustainable development of society. The assessment of land ecological security is of great significance for the management of regional ecological risks and guaranteeing ecological security. In this study, Jiayuguan City of Gansu Province, China is selected as the study area and an index evaluation system is constructed based on the model of the "quantity safety-quality safety-structure safety-guarantee safety" framework. This study reveals the dynamic change process of land ecological security from 2000 to 2017 and discusses its main influencing factors using the factor analysis method. The results show as follows: (1) the comprehensive index of land ecological security increased from 0.415 in 2000 to 0.644 in 2017 and the level of security upgraded from being less secure to critical secure. However, the level of security is still low and the risk of land ecological security still exists. (2) In the subsystem, the quantity safety index fluctuated from 0.11 to 0.14, and its improvement effect was not obvious. The quality safety index showed an upward trend with a fast annual growth rate of 6.89%. The structure safety index increased from 2000 to 2009; its annual growth rate was 4.49%, and it fluctuated from 0.14 to 0.15 after 2009. The guarantee safety index showed an obvious fluctuant trend, exhibiting a rising trend in 2000—2004 and 2011—2017 and a declining trend in 2005—2010. The trend exhibited an inclined "N" pattern. (3) The main factors influencing the change in land ecological security can be divided into four aspects: the background of the resources and environment, succession of industrial structure, control of environmental pollution, and effect of ecological construction. These factors are of paramount importance for ensuring sustainable land use and ecological civilization in Jiayuguan City in the future.

Key words: land ecological security; dynamic evaluation; influence factors; Jiayuguan City